

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.02.017

基于回归分析的汽车扶手箱下盖板注射成型工艺优化

庄燕¹, 朱敬花¹, 毛洪辉¹, 范希营²

(1. 九州职业技术学院, 江苏徐州 221116; 2. 江苏师范大学, 江苏徐州 221116)

摘要:以汽车扶手箱下盖板为研究对象,研究了保压压力、保压时、冷却时间、模具温度以及注塑温度五个注塑工艺因素对大型薄壁塑料件翘曲变形的影响。利用拉丁超立方抽样设计试验方案,基于 Moldflow 软件确定浇口位置、设置浇注系统和冷却系统,并对注射成型过程进行模拟仿真。通过对 25 组试验进行回归分析获得二阶回归模型,并结合遗传算法全局寻优,得到的最佳工艺参数组合为保压压力 100 MPa,保压时间 10 s,冷却时间 12 s,模具温度 60℃,注塑温度 250℃。结果表明,优化后的翘曲降低为 1.592 mm,成型质量有所提高。

关键词:汽车扶手箱下盖板;回归分析;参数优化;拉丁超立方试验设计方法

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)02-0101-05

Optimization of Injection Molding Process for Lower Cover of Automobile Armrest Box based on Regression Analysis

Zhuang Yan¹, Zhu Jinghua¹, Mao Honghui¹, Fan Xiyang²

(1. Jiuzhou Polytechnic, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract : The lower cover plate of the automobile armrest box was taken as the research object, the influence of packing pressure, packing time, cooling time, mold temperature and injection temperature on the forming warping of large thin-walled plastic parts were explored. Latin hypercube sampling was used to design the experiment plan. Besides, Moldflow software was adopted to determine the gate location, establish the pouring system and cooling system, in order to simulate the injection molding process. Based on 25 groups of experiments, the second-order equation was obtained through regression analysis. Genetic algorithm was used to optimize globally, and the best combination of process parameters was obtained as packing pressure 100 MPa, packing time 10 s, cooling time 12 s, mold temperature 60℃, injection temperature 250℃. The results show that the optimized warpage is 1.592 mm, which is effectively reduced and the molding quality is improved.

Keywords : lower cover plate of automobile armrest box ; regression analysis ; parameter optimization ; Latin hypercube experimental design method

近年来,随着科技的进步和经济水平的提高,汽车行业发展迅速,但同时带来的能源消耗以及尾气排放也成为热点话题。研究表明,减轻汽车质量可以节省燃油和降低碳排放,因此轻量化技术成为了汽车行业中降低车身质量的有效措施^[1-2]。注射成型技术是一种典型的塑料制品加工方法,成为汽车内饰件的主要加工方式,不仅可以降低成本,缩短周期,而且能够在以塑代钢的同时保证力学性能,并

实现汽车车身的轻量化^[3]。

汽车扶手箱下盖板是一种汽车内饰件,多采用注射成型加工获得,在加工时受到诸多因素的影响,不恰当的工艺参数会使得制品产生充填不足、飞边、熔接痕等缺陷,尤其是翘曲变形直接影响到塑料件表面质量和使用性能。然而传统注塑模具多依靠工人经验,个人主观性较强,缺乏客观高效方法^[4-6]。通过 Moldflow 软件可以模拟注射成型过程中熔体

通信作者: 庄燕,讲师,主要研究方向为数控加工、模具设计制造

收稿日期: 2021-12-03

引用格式: 庄燕,朱敬花,毛洪辉,等. 基于回归分析的汽车扶手箱下盖板注射成型工艺优化[J]. 工程塑料应用,2022,50(2):101-105.

Zhuang Yan, Zhu Jinghua, Mao Honghui, et al. Optimization of injection molding process for lower cover of automobile armrest box based on regression analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):101-105.

的流动状态,进而直观清晰地分析产生缺陷的原因,提高了生产的可靠性以及减少了生产成本^[7]。为了改善 Moldflow 的局限性,诸多研究人员将试验设计、数学建模方法与数值仿真相结合,对工艺参数进行优化^[8-9]。为改善汽车扶手箱下盖板的注射成型质量,笔者首先通过拉丁超立方设计试验方案,接着利用 Moldflow 模拟各组方案的注射成型过程获得翘曲变形量,最后基于试验数据建立翘曲变形的回归方程,并进行优化,以提高生产效率和产品质量。

1 结构工艺性分析

图1为某车型的扶手箱下盖板示意图,整体尺寸为 358 mm×235 mm×6.6 mm,平均壁厚 1.5 mm。塑料件外侧光滑,内侧中间1个安装孔,另外有8个安装孔分布在四周,用于与其他产品进行组装和固定;在左右侧多处存在肋板结构,主要用来增加强度,整体结构设计合理。

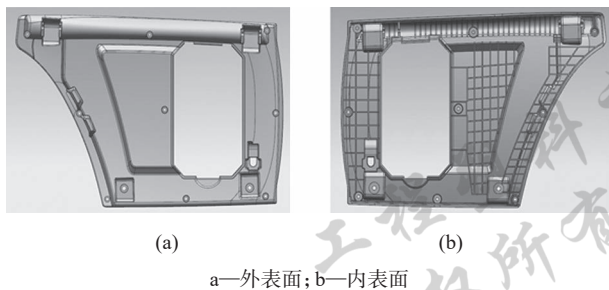


图1 汽车扶手箱下盖板三维图

2 注射成型 CAE 分析

2.1 浇口位置选择

将塑料件三维模型导入 Moldflow 中,利用网格划分工具进行有限元处理,按照中性面划分网格。成型材料选择 Chi Mei Corporation PA-765A 的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS)。划分后的汽车扶手箱下盖板网格模型如图2所示。

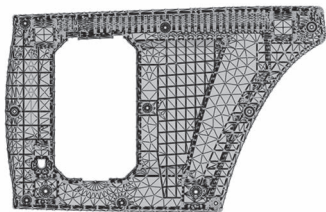


图2 网格模型

利用 Moldflow 进行浇口分析,结果包括流动阻力 (图3a) 和浇口匹配性 (图3b)。两项指标均表明最佳浇口位于塑料件中间。由于塑料件外观要求光滑美观,因此将浇口放置在内侧安装孔附近,如图3c所示。

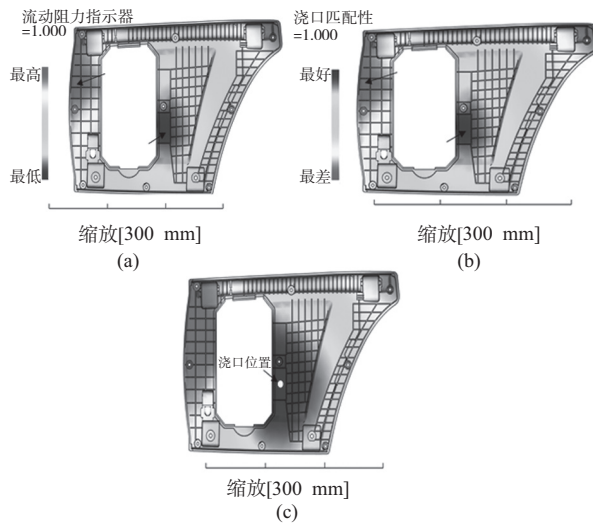


图3 浇口位置分析

2.2 浇注系统与冷却系统

由于汽车扶手箱下盖板尺寸较大,壁厚小,属于大型注塑薄壁件,所以采用一模一腔的结构。以点浇口形式进胶,主流道入口直径 4 mm,拔模角 3°,流道直径 8 mm。此外,为了保证成型过程中制品能够冷却均匀,在塑料件上下放置 2 根冷却水管,水管直径为 6 mm。最终建立的浇注系统和冷却系统如图4所示。

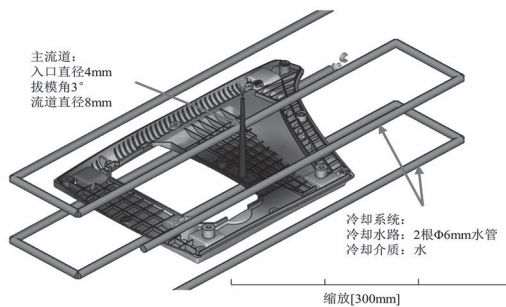


图4 浇注系统与冷却系统

3 构建回归模型

3.1 试验变量设计

塑料件的成型质量受到多个因素的影响,包括温度、压力、时间等,而由于注射成型主要有填充、保压、冷却三个过程,研究以保压压力 (x_1)、保压时间 (x_2)、冷却时间 (x_3)、模具温度 (x_4)、注塑温度 (x_5) 共 5 个因素为试验变量,具体取值范围见表1。其他参数均采用 Moldflow 的推荐值。

表1 试验变量因素

项目	因素				
	x_1/MPa	x_2/s	x_3/s	$x_4/^\circ\text{C}$	$x_5/^\circ\text{C}$
取值范围	70 ~ 100	4 ~ 10	6 ~ 12	60 ~ 90	230 ~ 250

3.2 基于拉丁超立方的试验方案设计

试验方案是建立数学模型的基础,直接关系着预测模型的精确性,更影响着最终的优化效果。相较于均匀试验和正交试验,拉丁超立方试验设计方法能够以较少数量更加均匀的样本点^[10-11]。笔者基于 Isight 软件采用拉丁超立方试验设计方法,确定 25 组试验方案,以翘曲变形量(y)为研究目标,在 Moldflow 中对每组方案进行注射成型仿真,得到试验数据见表 2。

表 2 拉丁超立方试验数据

序号	试验因素					试验目标
	x_1/MPa	x_2/s	x_3/s	$x_4/^\circ\text{C}$	$x_5/^\circ\text{C}$	
1	70.0	9.0	6.25	76.25	249.17	2.056
2	71.25	8.75	11.0	68.75	245.83	2.013
3	72.5	5.75	7.75	72.5	231.67	2.263
4	73.75	9.75	6.0	85.0	239.17	2.048
5	75.0	5.25	6.5	62.5	232.5	2.243
6	76.25	6.25	10.75	70.0	248.33	2.151
7	77.5	6.75	8.75	82.5	237.5	2.215
8	78.75	9.25	12.0	71.25	240.0	1.922
9	80.0	7.0	9.75	83.75	230.0	2.224
10	81.25	8.0	9.0	87.5	244.17	2.135
11	82.5	6.5	10.5	75.0	236.67	2.178
12	83.75	4.5	8.0	90.0	250.0	2.270
13	85.0	4.75	9.25	60.0	242.5	2.190
14	86.25	9.5	9.5	63.75	240.83	1.769
15	87.5	7.5	8.25	88.75	246.67	2.140
16	88.75	4.25	10.25	77.5	235.83	2.305
17	90.0	8.25	7.5	67.5	241.67	1.943
18	91.25	6.0	6.75	61.25	234.17	2.126
19	92.5	8.5	11.75	86.25	247.5	2.036
20	93.75	4.0	11.5	80.0	230.83	2.331
21	95.0	5.5	7.25	66.25	243.33	2.133
22	96.25	7.75	8.5	81.25	235.0	2.066
23	97.5	7.25	10.0	65.0	233.33	1.996
24	98.75	10.0	11.25	73.75	238.33	1.698
25	100.0	5.0	7.0	78.75	245.0	2.198

3.3 回归方程

在注射成型加工时,翘曲变形会受到多个工艺参数的影响,是多个变量耦合的结果,表明试验工艺与翘曲变形之间是一种多维非线性的关系^[12-13]。因此,只有设置合理的工艺参数才能使翘曲变形量最小,而合理的工艺参数往往可以通过构建数学模型并进行优化来获得。

笔者采用回归分析作为代理模型,构建 5 个工艺参数与翘曲变形量之间的映射关系。对于翘曲变形,注射成型工艺之间存在交互作用,因此采取二阶模型,回归模型如下:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中, y 为翘曲变形量, a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij} 为待求的模型系数; n 是影响因素数,本文为 5; x_i, x_j 为设计变量。

利用 Isight 软件进行回归分析,获得五元二次回归模型,相应的系数见表 3。

具体回归方程为: $y=7.595\,402\,345-0.014\,164\,821x_1+0.160\,956\,318x_2+0.0\,190\,743x_3-0.053\,780\,668x_4+0.023\,990\,073x_5+7.27\,732 \times 10^{-5}x_1^2-0.005\,797\,653x_2^2-0.001\,926\,629x_3^2-4.10\,076 \times 10^{-5}x_4^2-4.10\,076 \times 10^{-5}x_5^2-0.001\,457\,726x_1x_2-0.000\,231\,311x_1x_3+8.74\,842 \times 10^{-5}x_1x_4+1.01\,028 \times 10^{-5}x_1x_5-0.003\,697\,416x_2x_3+0.001\,307\,132x_2x_4-0.000\,378\,296x_2x_5+0.000\,9\,32\,306x_3x_4-2.41\,011 \times 10^{-5}x_3x_5+0.000\,169\,788x_4x_5$

表 3 翘曲变形回归分析系数表

变量	系数	变量	系数
常数项 a_0	7.595 402 345	x_1x_2	-0.001 457 726
x_1	-0.014 164 821	x_1x_3	-0.000 231 311
x_2	0.160 956 318	x_1x_4	8.74 842E-05
x_3	0.0 190 743	x_1x_5	1.01 028E-05
x_4	-0.053 780 668	x_2x_3	-0.003 697 416
x_5	-0.023 990 073	x_2x_4	0.001 307 132
x_1^2	7.27 732E-05	x_2x_5	-0.000 378 296
x_2^2	-0.005 797 653	x_3x_4	0.000 932 306
x_3^2	-0.001 926 629	x_3x_5	-2.41 011E-05
x_4^2	-4.10 076E-05	x_4x_5	0.000 169 788
x_5^2	2.08 041E-05		

将表 2 中 25 组试验参数分别代入上述回归方程中,得到相应的预测值。通过绘制预测值与仿真试验值的折线图(图 5),可以发现,预测值与试验值相差较小,预测精度较高。

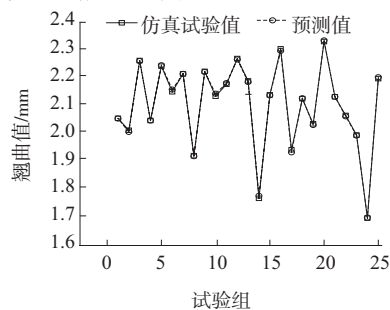


图 5 预测值与仿真试验值比较

3.4 方差分析

方差分析通过计算多项式模型自身的误差及其拟合误差的偏差平方和、均方值等,确定响应目标的总方差,并确定拟合精度(R^2)和 F 值。对上述回归方程进行方差分析可以判断该方程是否具有统计学意义,一般来说,拟合精度 R^2 越接近于 1,表明方

程拟合越精确;当 F 值大于临界值,那么回归模型较显著。选择0.05的显著性水平进行分析,回归模型的方差分析表见表4。由表4可以看出,翘曲变形 R^2 接近于1,故认为该回归模型拟合较为精确。经查 F 检验表, $F_{0.05}(5,19)=2.63$, $F > F_{0.05}(5,19)$,表明回归模型影响非常显著。

表4 方差分析表

差异源	自由度	偏差平方和	均方	F 值	R^2
模型	20	0.58 523	0.029 261	215.09	0.99 907
误差	4	0.00 054 417	0.00 013 604		
总计	24	0.58 577			

3.5 工艺参数优化

遗传算法是一种优化算法,近年来被广泛应用于各个领域,并且在注射成型工艺优化中发挥着重要作用^[14-16]。利用MATLAB的遗传算法工具箱进行优化,以回归模型为待求解的目标方程,5个工艺参数的范围即为自变量的条件。经过147次迭代,获得的最佳注塑工艺参数为保压压力100 MPa,保压时间10 s,冷却时间12 s,模具温度60℃,注塑温度250℃。将得到的最佳工艺参数在Moldflow中进行模拟,结果如图6所示,最佳注射成型工艺参数产生的翘曲变形量为1.592 mm,小于试验方案中各组翘曲值,质量得到改善。

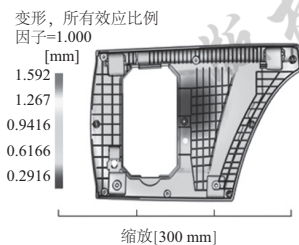


图6 优化后的翘曲变形

4 结论

(1) 基于Moldflow软件模拟汽车扶手箱下盖板的注射成型仿真过程。以保压压力、保压时间、冷却时间、模具温度、注塑温度为试验变量,研究其对翘曲变形的作用。并利用拉丁超立方试验设计方法设计试验方案。

(2) 根据试验结果进行回归分析,以5个工艺参数为自变量,翘曲变形为应变量,构建了二阶回归方程,并进行方差分析。利用回归方程对试验方案进行预测,结果表明预测值与仿真值相差较小,且拟合精度 R^2 接近于1,反映构建的回归模型比较精确。

(3) 利用MATLAB的遗传工具箱对所获得的

回归方程进行最小化寻优。优化结果表明,当保压压力100 MPa,保压时间10 s,冷却时间12 s,模具温度60℃,注塑温度250℃时,产生的翘曲变形量为1.592 mm,低于试验方案中各组翘曲值,塑料件质量得到显著提高,对实际生产具有指导意义。

参考文献

- [1] 姜鹤明,钱志强,王曙光,等. 基于BP神经网络的汽车后视镜主壳注塑工艺优化的研究[J]. 橡塑技术与装备,2021,47(22):19-22.
Jiang Heming, Qian Zhiqiang, Wang Shuguang, et al. Research on injection molding process optimization of automobile rearview mirror main shell based on BP neural network[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2021, 47(22):19-22.
- [2] 陈旭,田梦婕,周杨,等. 基于Moldflow与均匀试验设计的汽车前格栅注塑工艺参数优化[J]. 现代制造技术与装备,2021,57(6):102-103,106.
Chen Xu, Tian Mengjie, Zhou Yang, et al. The optimization of injection process parameters of automobile front grille based on moldflow and uniform test design[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(6):102-103,106.
- [3] 邱志文. Moldflow软件在汽车轻量化制造中的应用进展[J]. 智能制造,2021(2):119-122.
Qiu Zhiwen. Application progress of moldflow software in automotive lightweight manufacturing[J]. Intelligent Manufacturing, 2021(2):119-122.
- [4] 曹艳丽,范希营,郭永环,等. 采用RFR-GA算法的薄壁注塑件质量多目标优化[J]. 塑料工业,2021,49(1):65-70,101.
Cao Yanli, Fan Xiying, Guo Yonghuan, et al. Multi-objective optimization of injection process parameters for thin-walled parts based on RFR-GA algorithm[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(1):65-70,101.
- [5] 荆彦涛,王羽,曹冠忠,等. 基于CAE分析的水器显示面板翘曲变形优化设计[J]. 轻工标准与质量,2021(4):112-114.
Jing Yantao, Wang Yu, Cao Guanzhong, et al. Optimization design of warpage deformation of water heater display panel based on CAE analysis[J]. Standard & Quality of Light Industry, 2021(4):112-114.
- [6] Dang Xuan-Phuong. General frameworks for optimization of plastic injection molding process parameters[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2014, 41:15-27.
- [7] 胡祚麻,刘淑梅,毛欣然,等. 基于响应面法的汽车接插件翘曲变形优化[J]. 上海工程技术大学学报,2021,35(2):113-117.
Hu Zuoxiu, Liu Shumei, Mao Xinran, et al. Warpage optimization of automobile connector based on response surface method[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2021, 35(2):113-117.
- [8] Singh G, Verma A. A brief review on injection moulding

- manufacturing process[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(2, Part A):1 423–1 433.
- [9] 程国飞,丁立刚,魏文强,等. 基于 Moldflow 的洗衣机上面板浇注系统优化设计[J]. *模具制造*, 2020, 20(6):54–57.
Cheng Guofei, Ding Ligang, Wei Wenqiang, et al. Optimization design of pouring system for the washing machine upper panel based on mold flow[J]. *Die & Mould Manufacture*, 2020, 20(6):54–57.
- [10] 于佳丽,张继祥,李又兵,等. 车门内饰塑件翘曲变形分析及成型工艺优化[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(11):78–83, 88.
Yu Jiali, Zhang Jixiang, Li Youbing, et al. Warpage deformation analysis and molding process optimization of door interior plastic parts[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(11):78–83, 88.
- [11] 汤零骁,朱茂桃,吴蕾. 基于 Moldflow 和代理模型的注塑工艺参数优化[J]. *塑料科技*, 2019, 47(6):94–98.
Tang Jixiao, Zhu Maotao, Wu Lei. Optimization of injection molding process parameters based on moldflow analysis and surrogate model[J]. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(6):94–98.
- [12] 邓然,胡嘉晨,钱佳豪,等. 基于正交试验法的三相电机连接器注塑成型翘曲变形优化[J]. *塑料科技*, 2021, 49(7):66–71.
Deng Ran, Hu Jiachen, Qian Jiahao, et al. Optimization of warpage deformation of three-phase motor connector injection molding based on orthogonal test method[J]. *Plastics Science and Technology*, 2021, 49(7):66–71.
- [13] 马旭东,孙理,栾冬. 基于 HsCAE 和 BP 神经网络汽车饰件工艺优化[J]. *塑料*, 2021, 50(2):87–92, 98.
Ma Xudong, Sun Li, Luan Dong. Process optimization of automotive trim based on HsCAE and BP neural network[J]. *Plastics*, 2021, 50(2):87–92, 98.
- [14] 张浴华. 基于 CAE 技术的汽车塑件注塑成型过程中遗传算法的应用探讨[J]. *塑料工业*, 2019, 47(12):62–65.
Zhang Yuhua. Discuss on application of genetic algorithm in injection molding process of automotive plastic parts based on CAE technology[J]. *China Plastics Industry*, 2019, 47(12):62–65.
- [15] 王博,赵东平,李锋,等. 基于反向传播神经网络与遗传算法优化复合材料零件注塑成型工艺参数[J]. *机械工程材料*, 2021, 45(7):63–68.
Wang Bo, Zhao Dongping, Li Feng, et al. Optimization of injection process parameters for composite parts by BP neural network and genetic algorithm[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2021, 45(7):63–68.
- [16] 朱丹. 基于遗传算法的注塑成型工艺参数优化研究[J]. *微型电脑应用*, 2021, 37(5):110–112.
Zhu Dan. Research on optimization of injection molding process parameters based on genetic algorithm[J]. *Microcomputer Applications*, 2021, 45(7):63–68.
-
- (上接第 90 页)
- [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(5):1 025–1 034.
- [15] Khalilian S A, Park S S, Freiheit T I. The application of commercial injection molding software to micro-component design and process development[C]// 8th International Conference on MicroManufacturing, University of Victoria, Victoria, BC, Canada, March, 2013, 25-2:50–56.
- [16] Jiang Zhuangqiang. Three-dimension numerical simulation of filling stage in micro-injection molding[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.
- [17] Worner M. Numerical modeling of multiphase flows in microfluidics and micro process: a review of methods and applications[J]. *Microfluid Nanofluid*, 2012, 12(6):841–886.
- [18] Zhao D Y, Jin Y F, Wang M J, et al. Numerical simulation and experimental study of polymer micro extrusion flow[C]// International Conference on Mechatronics and Automation. Dalian: 2009, 3 155–3 160.
- [19] 娄燕,裴九龙,何培乾,等. 基于分子链段长度的微观黏度模型研究[J]. *深圳大学学报理工版*, 2013, 30(6):629–635.
- Lou Yan, Pei Jiulong, He Peiqian, et al. Research on a micro-viscosity model based on the molecular chain length[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2013, 30(6):629–635.
- [20] Loussif N, Orfi J. Simultaneously developing laminar flow in an isothermal micro-tube with slip flow models[J]. *Heat & Mass Transfer*, 2014, 50(4):573–582.
- [21] Piwnik J, Mogielnicki K. The friction influence on stress in micro extrusion[J]. *Archives of Foundry Engineering*, 2010, 10(SI1):451–454.
- [22] Anderson J D, 杨永等,译. *空气动力学基础* [M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
Anderson J D, Yang Yong, et al. *Fundamentals of Aerodynamics* [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2004.
- [23] Chang R Y, Chen C H, Su K S. Modifying the tait equation with cooling - rate effects to predict the pressure–volume–temperature behaviors of amorphous polymers: Modeling and experiments[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1996, 36(13):1 789–1 795.